

Москвіна І. І.,  
Стефанович Т. О.,  
Щербовських С. В.

## ВРАХУВАННЯ ПОМИЛОК ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО РОДУ ПЕРЕМИКАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМИ ІЗ ГАРЯЧИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

*Запропоновано модель надійності дубльованої системи із гарячим резервуванням та неідеальним перемикальним пристроєм для визначення ймовірності її безвідмовної роботи. Особливість моделі полягає у тому, що у ній адекватно враховано помилки першого та другого роду для перемикального пристрою. Для визначення ймовірнісних характеристик системи використано динамічне дерево відмов та марковську модель.*

**Ключові слова:** модель надійності, динамічне дерево відмов, гаряче резервування, перемикальний пристрій.

### 1. Вступ

Одним із способів підвищення надійності технічних систем є застосування структурного резервування. Зміст такого резервування полягає у тому, що в структуру системи вводять надлишкові елементи. Такі резервні елементи у випадку відмови основних елементів системи після відповідного перемикання виконують їх функції. Найвживанішим типом структурного резервування є гаряче резервування. Для такого типу резервування надлишкові елементи, незалежно від стану інших елементів системи та стану перемикального пристрою, весь час перебувають у навантаженому режимі. Перемикальний пристрій здійснює підключення резервних елементів у випадку, якщо основні елементи втратили працездатність. Під час аналізу надійності таких систем одним із важливих факторів є врахування впливу самого перемикального пристрою на показники надійності системи. Цей вплив може проявлятися у помилках першого та другого роду. Під помилкою першого роду розуміємо хибне спрацювання перемикального пристрою. Це означає, що основний елемент працездатний, проте перемикальний пристрій вирішив, що цей елемент непрацездатний, і підключив резервний елемент. Під помилкою другого роду розуміємо пропуск моменту спрацювання перемикальним пристроєм. Це означає, що основний елемент відмовив, проте перемикальний пристрій вирішив, що цей елемент працездатний, і не здійснив підключення резервного елемента. Обидві помилки призводять до зниження надійності системи та недовикористання її ресурсу.

Стаття присвячена проблемі формалізації та аналізу впливу похибок першого та другого роду перемикального пристрою на надійність систем із гарячим резервуванням. Дана проблема актуальна під час проектування та експлуатації радіоелектронних систем відповідального призначення.

### 2. Аналіз літературних джерел

Для розв'язання поставленої проблеми у літературі запропоновано два основних підходи. Перший підхід, який подано у роботах [1, 2], ґрунтується на застосуван-

ні логіко-ймовірнісного методу. Згідно із цим підходом в структуру системи, а саме послідовно резервним елементам, вводять умовний елемент, який відповідає перемикальному пристрою. До різновиду цього підходу слід також віднести метод, який ґрунтується на спрощених емпіричних формулах, описаний у роботі [3]. Недолік підходу полягає у тому, що помилка першого роду у такий спосіб не може бути врахована, а помилка другого роду врахована у першому наближенні. Зокрема, не враховано ефект, що після переключення перемикального пристрою з основних елементів на резервні непрацездатність перемикального пристрою не впливає на систему.

Другий підхід базується на побудові графа станів та переходів системи і подальшому його аналізі на основі марковської моделі або методом Монте-Карло. У межах цього підходу виділяємо кілька способів його застосування. Для простих систем таку побудову можна здійснити вручну, як це показано у статті [4]. У роботах [5–8] побудову графа станів та переходів систем такого типу можна здійснити на основі технології моделювання систем із елементами, які перебувають у двох та у багатьох станах. У роботах [9–12] для розв'язання цієї ж задачі пропонується застосувати дерева відмов у поєднанні із логічними функціями масштабування. Хоча вказані підходи потенційно прийнятні для розв'язання поставленої проблеми, у літературі не знайдено математичних моделей надійності технічних систем, в яких одночасно враховано вплив помилок першого і другого роду для перемикального пристрою.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

**Об'єкт дослідження** — математичне моделювання надійності резервованої технічної системи з врахуванням процесів у перемикальному пристрої.

**Мета дослідження** — розроблення моделі надійності невідновлюваної системи із гарячим резервуванням, яка враховує помилки першого та другого роду для перемикального пристрою.

У роботі розв'язано такі задачі:

— математично описано надійність системи із гарячим резервуванням та перемикальним прист-

роєм на основі  $k$ -термінального динамічного дерева відмов;

- побудовано граф станів і переходів системи та однорідну марковську модель системи;
- проаналізовано вплив помилок першого і другого роду перемикального пристрою на характеристики надійності системи.

#### 4. Опис системи та її $k$ -термінальне динамічне дерево відмов

Структура досліджуваної радіоелектронної системи (рис. 1) складена із таких елементів: основний передавач TR1, резервний передавач TR2, перемикальний пристрій SA.

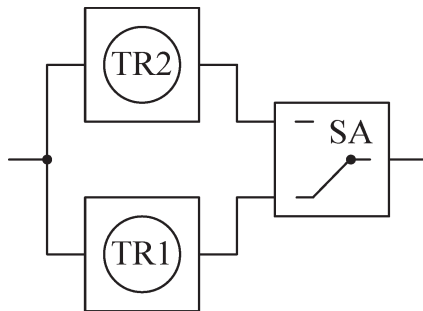


Рис. 1. Структурна схема системи

Система працює наступним способом. У початковому стані перемикальний пристрій SA підключає основний передавач TR1, який забезпечує працездатність системи, а резервний передавач TR2 у цей час перебуває у гарячому резерві і незатребуваний. Після відмови основного передавача TR1 перемикальний пристрій SA підключає резервний передавач TR2. Якщо на момент підключення резервний передавач TR2 працездатний, то він забезпечуватиме подальшу працездатність усієї системи, інакше система стає непрацездатною. Вважаємо, що ремонтування елементів системи відсутнє, а перемикальний пристрій допускає помилки першого та другого роду. З точки зору надійності, система виконує дві функції. Первинна функція полягає у забезпеченні пересилання радіосигналу передавачами, а вторинна — у відслідковуванні стану основного передавача перемикальним пристроєм.

Формалізуємо надійність системи двохтермінальним динамічним деревом відмов, структура якого подана на рис. 2.  $k$ -термінальне динамічне дерево відмов є математичною моделлю, яка описує умову непрацездатності системи за кожною її функцією та умови зміни навантаження між її елементами на основі блоків, які позначають логічні операції та операції відношення. Непрацездатність системи за первинною функцією позначена блоком «вершина подій 1». Така непрацездатність системи відбувається, якщо обидва передавачі не здатні виконувати свою функцію, що описано блоком «оператор 1», тип якого задано логічною операцією І. Основний передавач TR1 нездатний виконувати свою функцію, якщо він непрацездатний або контакти перемикального пристрою SA підключені на затискачі резервного передавача TR2, що описано блоком «оператор 2», тип якого задано логічною операцією АБО.

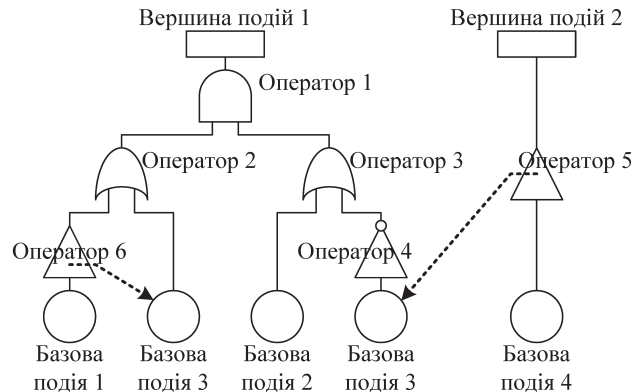


Рис. 2. Динамічне дерево відмов системи

У свою чергу, резервний передавач TR2 нездатний виконувати свою функцію, якщо він непрацездатний або контакти перемикального SA пристрою підключені на затискачі основного передавача TR1, що описано блоком «оператор 3», тип якого задано логічною операцією АБО. Інверсний стан контактів перемикального пристрою задано блоком «оператор 4», тип якого задано логічною операцією НІ. Непрацездатність основного передавача TR1 та резервного передавача TR2 описано блоками «базова подія 1» і «базова подія 2», а їх напрацювання до відмови розподілено за експоненціальним законом із параметрами  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ . Стан контактів перемикального пристрою описано блоком «базова подія 3». Зокрема, підключення на затискачі основного передавача TR1 задано логічним значенням ХИБНО, а підключення на затискачі резервного передавача TR2 — логічним значенням ІСТИННО. Випадковий процес перемикавання із затискачів основного передавача на затискачі резервного задано експоненціальним законом із параметром  $\lambda_3$ . Непрацездатність системи за вторинною функцією позначена блоком «вершина подій 2». Така непрацездатність настає у разі втрати перемикальним пристроєм здатності відслідковувати стан основного передавача, що описано блоком «базова подія 4». Випадковий процес, який описує здатність відслідковувати стан основного передавача задано експоненціальним законом із параметром  $\lambda_4$ .

У системі відбувається два динамічних процеси, обидва із яких змінюють інтенсивність протікання процесу перемикавання із затискачів основного передавача на затискачі резервного передавача, залежно від здатності перемикальним пристроєм відслідковувати стан основного передавача та стану основного передавача.

Для опису першого процесу введемо у структуру динамічного дерева відмов блок «оператор 5», який є повторювачем логічного сигналу, і задамо у ньому умову зміни навантаження. Якщо на вхід блоку «оператор 5» подається логічний сигнал ІСТИННО, тобто перемикальний пристрій нездатний відслідковувати стан основного передавача, то інтенсивність процесу перемикавання із затискачів основного передавача на затискачі резервного передавача, заданого блоком «базова подія 3», встановлюємо рівною 0.

Для опису другого процесу введемо у структуру динамічного дерева відмов блок «оператор 6», який так само є повторювачем логічного сигналу, і задамо у ньому умову зміни навантаження. Якщо на вхід блоку

«оператор 6» подається логічний сигнал ІСТИНО, тобто основний передавач непрацездатний, то інтенсивність процесу перемикавання із затискачів основного передавача на затискачі резервного передавача, заданого блоком «базова подія 3», збільшуємо в  $k$  разів. З фізичної точки зору цей коефіцієнт зводить інтенсивність хибного перемикавання  $\lambda_3$  до середньої тривалості перемикавання контактів, зумовленої командою на перемикавання.

### 5. Модель станів та подій системи

На підставі поданого вище  $k$ -термінального динамічного дерева відмов системи згідно із формалізованими правилами [12] складено модель станів та подій. Така модель є математичним описом станів, в яких може перебувати система, та подій, які у ній можуть відбуватися, у проекційному зв'язку до процесів, що у ній протікають. Граф такої моделі подано на рис. 3, а її параметри у табл. 1. У моделі станів та подій процес напруження основного передавача TR1 позначено як  $P_1$ , резервного передавача TR2 —  $P_2$ , процес перемикавання контактів —  $P_3$ , процес здатності відслідковувати стан основного передавача —  $P_4$ .

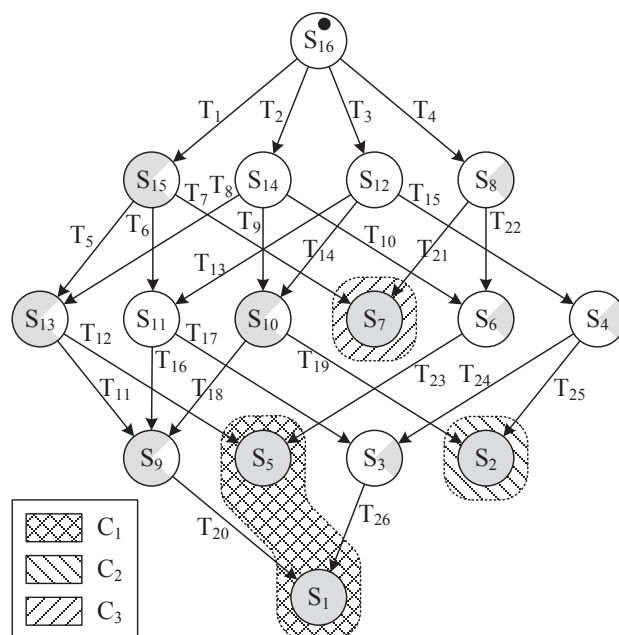



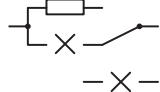
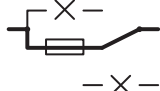
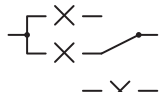

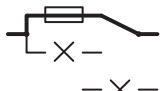
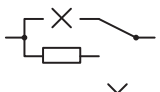
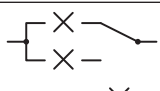
Рис. 3. Граф станів та переходів системи

Таблиця 1

Параметри моделі станів та подій системи

№	Опис станів								Опис подій		
	Початковий стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування				$y_1$	$y_2$	Назва події	Завершальний процес	Кінцевий стан
			$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$					
1	S16		1	1	1	1	1	1	$T_1$	$P_1$	$S_{15}$
2									$T_2$	$P_2$	$S_{14}$
3									$T_3$	$P_3$	$S_{12}$
4									$T_4$	$P_4$	$S_8$
5	S15		0	1	$k$	1	0	1	$T_5$	$P_2$	$S_{13}$
6									$T_6$	$P_3$	$S_{11}$
7									$T_7$	$P_4$	$S_7$
8	S14		1	0	1	1	1	1	$T_8$	$P_1$	$S_{13}$
9									$T_9$	$P_3$	$S_{10}$
10									$T_{10}$	$P_4$	$S_6$
11	S13		0	0	$k$	1	0	1	$T_{11}$	$P_3$	$S_9$
12									$T_{12}$	$P_4$	$S_5$
13	S12		1	1	0	1	1	1	$T_{13}$	$P_1$	$S_{11}$
14									$T_{14}$	$P_2$	$S_{10}$
15									$T_{15}$	$P_4$	$S_4$
16	S11		0	1	0	1	1	1	$T_{16}$	$P_2$	$S_9$
17									$T_{17}$	$P_4$	$S_3$
18	S10		1	0	0	1	0	1	$T_{18}$	$P_1$	$S_9$
19									$T_{19}$	$P_4$	$S_2$
20	S9		0	0	0	1	0	1	$T_{20}$	$P_4$	$S_1$

Закінчення табл. 1

№	Опис станів								Опис подій		
	Початковий стан	Графічний опис стану	Коефіцієнти масштабування				$y_1$	$y_2$	Назва події	Завершальний процес	Кінцевий стан
			$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$					
21	58		1	1	0	0	1	0	$T_{21}$	$P_1$	$S_7$
22									$T_{22}$	$P_2$	$S_6$
23	57		0	0	0	0	0	0	—	—	—
24	56		1	0	0	0	1	0	$T_{23}$	$P_1$	$S_5$
25	55		0	0	0	0	0	0	—	—	—
26	54		1	1	0	0	1	0	$T_{24}$	$P_1$	$S_3$
27									$T_{25}$	$P_2$	$S_2$
28	53		0	1	0	0	1	0	$T_{26}$	$P_2$	$S_1$
29	52		0	0	0	0	0	0	—	—	—
30	51		0	0	0	0	0	0	—	—	—

На рис. 3 працездатні стани за обома функціями системи позначені колом, яке зафарбоване білим; непрацездатні стани за первинною функцією позначені 3/4 сегмента кола, яке зафарбоване сірим; непрацездатні стани за вторинною функцією позначені 1/4 сегмента кола, яке зафарбоване сірим; непрацездатні стани за обома функціями позначені колом, яке зафарбоване сірим. Система перебуває у шістнадцяти станах, із яких вісім відповідають працездатності за первинною функцією —  $S_3, S_4, S_6, S_8, S_{11}, S_{12}, S_{14}$  та  $S_{16}$ , та вісім за вторинною —  $S_9-S_{16}$ . Граф містить чотири поглинаючих стани, які відповідають непрацездатності системи за обома функціями. Ці стани згрупуємо у три множини, кожна із яких відповідає певному наслідку відмови. Перша множина  $C_1$  відповідає такій непрацездатності системи, в якій непрацездатні обидва передавачі, тобто система цілком використала свій ресурс. В цю множину входять непрацездатні стани  $S_1$  та  $S_5$ . Друга множина  $C_2$  містить непрацездатний стан  $S_2$ , в якому непрацездатний другий передавач, а перший залишився працездатним унаслідок помилки перемикального пристрою першого роду.

Третя множина  $C_3$  містить непрацездатний стан  $S_7$ , в якій непрацездатний перший передавач, а другий залишився працездатним унаслідок помилки перемикального пристрою другого роду. Обидві множини  $C_2$

та  $C_3$  відповідають недовикористанню свого ресурсу. У системі відбувається двадцять шість подій, із яких дев'ять спричиняють непрацездатність за першою функцією —  $T_1, T_8, T_9, T_{14}, T_{16}, T_{21}, T_{23}, T_{25}$  та  $T_{26}$ ; та сім за другою —  $T_4, T_{10}, T_{12}, T_{15}, T_{17}, T_{19}$  та  $T_{20}$ . Параметрами станів є значення коефіцієнтів масштабування для процесів  $P_1-P_4$  та логічна функція працездатності за кожною із функцій, яка набуває значення «1», якщо система працездатна, та «0» — якщо ні. Параметрами подій є назва початкового стану, назва процесу, який завершився, та назва кінцевого стану.

## 6. Марковська модель системи

Ґрунтуючись на моделі станів та подій системи побудовано однорідну марковську модель. Таку модель подають системою рівнянь Колмогорова-Чепмена:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p}(t) = \mathbf{A} \mathbf{p}(t),$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{p}(t).$$

де  $t$  — час;  $\mathbf{p}(t)$  — вектор, що містить функції ймовірності станів;  $\mathbf{y}(t)$  — вектор, який містить досліджувані функції ймовірності.

Марковська модель є множиною матриць, які задають інтенсивності переходів між станами  $A$ , початкові ймовірності станів  $p(0)$ , а також зв'язок  $C$  функцій ймовірності станів із характеристиками надійності системи. Для досліджуваної системи марковська модель така:

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_2 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & \lambda_2 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & \lambda_3 & \lambda_1 & & & & & & & & & & & & & & \\ & \lambda_4 & & \lambda_4 & & & & & & & & & & & & & \\ & & \lambda_1 & & \lambda_4 & & & & & & & & & & & & \\ & & \lambda_2 & & & \lambda_4 & & & & & & & & & & & \\ & & \lambda_1 & & & & \lambda_4 & & & & & & & & & & \\ & & \lambda_6 & & & & & \lambda_4 & & & & & & & & & \\ & & & \lambda_1 & & & & & \lambda_4 & & & & & & & & \\ & & & \lambda_2 & & & & & & \lambda_4 & & & & & & & \\ & & & \lambda_1 & & & & & & & \lambda_4 & & & & & & \\ & & & \lambda_8 & & & & & & & & \lambda_4 & & & & & \\ & & & & \lambda_9 & \lambda_1 & \lambda_2 & & & & & & \lambda_4 & & & & \\ & & & & \lambda_{10} & & \lambda_2 & \lambda_3 & & & & & & \lambda_4 & & & \\ & & & & & \lambda_{11} & \lambda_1 & & & & & & & & \lambda_3 & & \\ & & & & & \lambda_{12} & & & & & & & & & & \lambda_3 & \\ & & & & & & \lambda_{13} & \lambda_1 & \lambda_2 & & & & & & & & \\ & & & & & & & \lambda_{14} & & & & & & & & \lambda_2 & \\ & & & & & & & & \lambda_{15} & \lambda_1 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \lambda_{16} & & & & & & & \end{bmatrix}, \quad p(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & 1 & \end{bmatrix}.$$

Діагональні елементи матриці  $A$  обчислено згідно із такими виразами:

$$\begin{aligned} \Lambda_3 &= -\lambda_2, & \Lambda_9 &= -\lambda_4, & \Lambda_{13} &= -(\lambda_3 + \lambda_4) \\ \Lambda_4 &= -(\lambda_1 + \lambda_2), & \Lambda_{10} &= -(\lambda_1 + \lambda_4), & \Lambda_{14} &= -(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4) \\ \Lambda_6 &= -\lambda_1, & \Lambda_{11} &= -(\lambda_2 + \lambda_4), & \Lambda_{15} &= -(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4), \\ \Lambda_8 &= -(\lambda_1 + \lambda_2), & \Lambda_{12} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4), & \Lambda_{16} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4). \end{aligned}$$

Матрицю  $C$  складено так, щоб перший її рядок відповідав ймовірності безвідмовної роботи системи, а три наступних рядки — ймовірнісним характеристикам наслідків відмов  $C_1$ - $C_3$ .

## 7. Аналіз впливу помилок першого та другого роду на ймовірність безвідмовної роботи системи

На основі однорідної марковської моделі обчислено сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи. Під час аналізу впливу помилок першого та другого роду важливим є не абсолютне значення кожного із параметрів, а співвідношення параметрів передавачів із параметрами перемикального пристрою, тому доцільно виконувати обчислення у відносних одиницях. За базову величину приймаємо інтенсивність відмов основного передавача  $\lambda_1 = 1$ . Вважаємо, що резервний передавач є аналогічним до основного, тому  $\lambda_2 = 1$ . Приймаємо, що відношення інтенсивності хибного перемикавання  $\lambda_3$  до середньої тривалості перемикавання становить  $k = 100\,000$ . Значення цього відношення обернено пропорційно інерційності спрацювання перемикального пристрою і, в граничному випадку, має прямувати до нескінченності.

На рис. 4, а подано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметра  $\lambda_3$ , який відповідає помилці першого роду, за умови  $\lambda_4 = 1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $\lambda_3 = 0,25$ , крива 2 —  $\lambda_3 = 0,5$ , крива 3 —  $\lambda_3 = 0,75$ , крива 4 —

$\lambda_3 = 1$ , крива 5 —  $\lambda_3 = 2$ , крива 6 —  $\lambda_3 = 5$ , крива 7 —  $\lambda_3 = 10$  та крива 8 —  $\lambda_3 = 100$ .

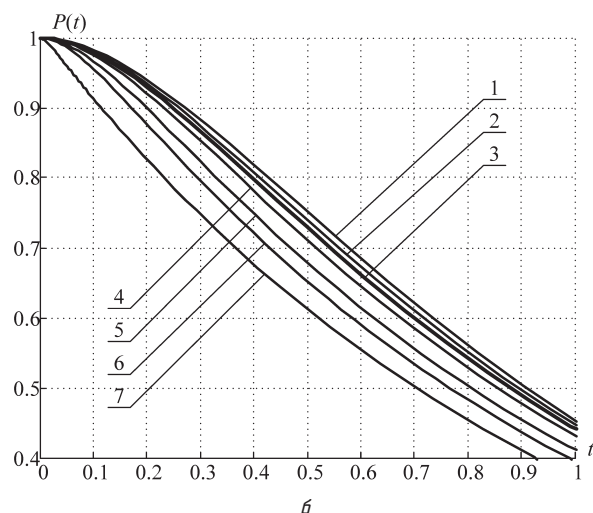
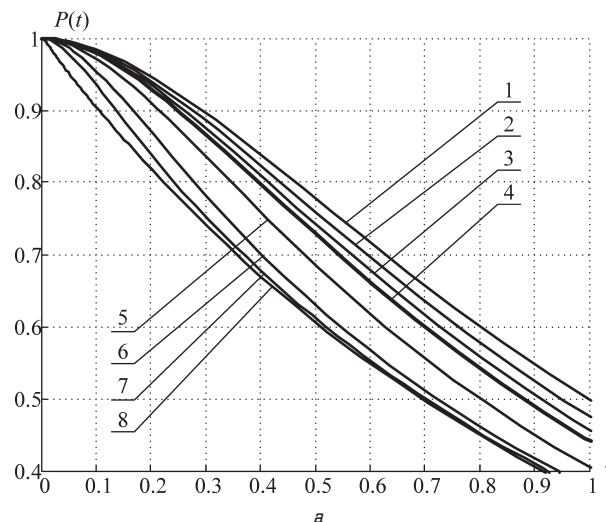


Рис. 4. Сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи, які показують вплив помилки перемикального пристрою: а — першого роду; б — другого роду

На рис. 4, б подано сімейство кривих ймовірності безвідмовної роботи системи для різних значень параметра  $\lambda_4$ , який відповідає помилці другого роду, за умови  $\lambda_3 = 1$ . Зокрема, крива 1 відповідає значенню  $\lambda_4 = 0$ , крива 2 —  $\lambda_4 = 0,5$ , крива 3 —  $\lambda_4 = 1$ , крива 4 —  $\lambda_4 = 2$ , крива 5 —  $\lambda_4 = 5$ , крива 6 —  $\lambda_4 = 10$  та крива 7 —  $\lambda_4 = 100$ . З метою порівняння результатів на рис. 4, а, крива 4, та на рис. 4, б, крива 3, накреслена потовщеною лінією характеристика, яка відповідає умові  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1$ . Обидва параметри  $\lambda_3$  та  $\lambda_4$  можуть набувати значень у діапазоні від 0 до  $\infty$ , де значення 0 відповідає відсутності впливу помилки, а значення  $\infty$  — абсолютному впливу цієї помилки. Як видно із рис. 4 при покроковому збільшенні значень параметрів  $\lambda_3$  та  $\lambda_4$  ймовірність безвідмовної роботи системи має тенденцію до зниження.

Для перевірки коректності запропонованої моделі показано, що за умови прямування параметрів  $\lambda_3$  та  $\lambda_4$  до граничних значень, ймовірність безвідмовної роботи системи прямуватиме до очікуваних граничних



характеристик. Зокрема, якщо  $\lambda_3 = 0$  і  $\lambda_4 = 0$ , то ймовірність безвідмовної роботи системи визначатиметься виразом для звичайного паралельного резервування. Якщо  $\lambda_3 = \infty$  і  $\lambda_4 = 0$ , то ймовірність безвідмовної роботи системи визначатиметься лише безвідмовністю резервного передавача. Якщо  $\lambda_3 = 0$  і  $\lambda_4 = \infty$ , то ймовірність безвідмовної роботи системи визначатиметься лише безвідмовністю основного передавача.

## 8. Висновки

У статті розроблено математичну модель надійності, яка враховує помилки першого та другого роду перемикального пристрою для системи із гарячим резервуванням. Така модель призначена для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи.

Надійність системи математично описано  $k$ -термінальним динамічним деревом відмов, в якому задано логічні умови взаємного впливу елементів системи та перемикального пристрою. Ймовірнісні характеристики системи визначено за однорідною марковською моделлю, яка сформована на основі дерева відмов.

За допомогою марковської моделі проаналізовано, як впливають помилки першого та другого роду на ймовірнісні характеристики досліджуваної системи. Показано, що при збільшенні значення параметрів, які відповідають цим помилкам, зменшується ймовірність безвідмовної роботи системи у визначених межах.

Подальші дослідження скеровані на розроблення моделі надійності системи із заміщувальним резервуванням, яка враховуватиме вплив помилок першого та другого роду перемикального пристрою.

## Література

- Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных систем [Текст] / Г. В. Дружинин. — М.: ЭНЕРГИЯ, 1977. — 536 с.
- Abouei Ardakan, M. Reliability optimization of series-parallel systems with mixed redundancy strategy in subsystems [Text] / M. Abouei Ardakan, A. Zeinal Hamadani // Reliability Engineering & System Safety. — 2014. — Vol. 130. — P. 132–139. doi:10.1016/j.res.2014.06.001
- Ушаков, И. А. Курс теории надежности систем [Текст]: учебное пособие / И. А. Ушаков. — М.: Дрофа, 2008. — 239 с.
- Богатырев, В. А. Надежность дублированных вычислительных комплексов [Текст] / В. А. Богатырев, С. А. Башкова, В. Ф. Беззубов, А. В. Полякова, Е. Ю. Котельникова, И. Ю. Голубев [Текст] // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — № 6 (76). — С. 76–80.
- Волочий, Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем [Текст] / Б. Ю. Волочий. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2004. — 219 с.
- Zamalieva, D. A probabilistic model for online scenario labeling in dynamic event tree generation [Text] / D. Zamalieva, A. Yilmaz, T. Aldemir // Reliability Engineering & System Safety. — 2013. — Vol. 120. — P. 18–26. doi:10.1016/j.res.2013.02.028
- Zamalieva, D. Online scenario labeling using a hidden Markov model for assessment of nuclear plant state [Text] / D. Zamalieva, A. Yilmaz, T. Aldemir // Reliability Engineering & System Safety. — 2013. — Vol. 110. — P. 1–13. doi:10.1016/j.res.2012.09.002
- Manno, G. Conception of Repairable Dynamic Fault Trees and resolution by the use of RAATSS, a Matlab® toolbox based on the ATS formalism [Text] / G. Manno, F. Chiacchio, L. Compagno, D. D'Urso, N. Trapani // Reliability Engineering & System Safety. — 2014. — Vol. 121. — P. 250–262. doi:10.1016/j.res.2013.09.002
- Codetta-Raiteri, D. Integrating several formalisms in order to increase Fault Trees' modeling power [Text] / D. Codetta-Raiteri // Reliability Engineering & System Safety. — 2011. — Vol. 96, № 5. — P. 534–544. doi:10.1016/j.res.2010.12.027
- Mandziy, B. Mathematical model for failure cause analysis of electrical systems with load-sharing redundancy of component [Text] / B. Mandziy, O. Lozynsky, S. Shcherbovskykh // Przegląd Elektrotechniczny. — 2013. — Vol. 89, № 11. — P. 244–247.
- Shcherbovskykh, S. Failure intensity determination for system with standby doubling [Text] / S. Shcherbovskykh, O. Lozynsky, Ya. Marushchak // Przegląd Elektrotechniczny. — 2011. — Vol. 87, № 5. — P. 160–162.
- Щербовських, С. В. Математичні моделі та методи для визначення характеристик надійності багатотермінальних систем із урахуванням перерозподілу навантаження [Текст]: монографія / С. В. Щербовських. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. — 296 с.

## УЧЕТ ОШИБОК ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМЫ С ГОРЯЧИМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Предложена модель надежности дублированной системы с горячим резервированием и неидеальным переключающим устройством для определения вероятности ее безотказной работы. Особенность модели заключается в том, что в ней адекватно учтены ошибки первого и второго рода для переключающего устройства. Для определения вероятностных характеристик системы использовано динамическое дерево отказов и марковскую модель.

**Ключевые слова:** модель надежности, динамическое дерево отказов, горячее резервирование, переключающее устройство.

**Москвіна Ірина Ігорівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра методики викладання фізико-математичних дисциплін та інформаційних технологій у навчанні, Бердянський державний педагогічний університет, Україна, e-mail: iriwa-gt@inbox.ru.

**Стефанович Тетяна Олександрівна**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра проектування та експлуатації машин, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

**Щербовських Сергій Володимирович**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, науково-дослідна група ДБ/ТРИКАФ, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

**Москвина Ирина Игоревна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра преподавания физико-математических дисциплин и информационных технологий в обучении, Бердянский государственный педагогический университет, Украина.

**Стефанович Татьяна Александровна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра проектирования и эксплуатации машин, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

**Щербовских Сергей Владимирович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская группа ДБ/ТРИКАФ, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

**Moskvina Irina**, Berdyansk State Pedagogical University, Ukraine, e-mail: iriwa-gt@inbox.ru.

**Stefanovych Tetiana**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine. **Shcherbovskykh Serhiy**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine